

文章编号: 1672-2892(2012)04-0451-05

微波能工业应用研究进展

刘长军, 吴 昕

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 微波作为一种新型高效加热能源广泛地应用于众多领域。随着其应用的逐渐深入, 微波所具有的优点越来越明显, 并且已经在工业上产生了良好的经济效益。本文首先介绍了微波能应用机理与大功率微波源, 综述了在工业领域内微波能应用的现状和进展, 随后指出了微波技术现有发展状况, 并展望了国内微波能在产业方向上的应用前景。

关键词: 微波能; 微波加热; 热效应; 工业应用

中图分类号: TN015; TQ9

文献标识码: A

Research progress on microwave energy industrial applications

LIU Chang-jun, WU Xin

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: Microwave has been widely applied to many fields as a novel and efficient energy source. It is proved that the microwave techniques own many advantages in industry applications over conventional ones, and bring more benefits into industrial applications. The mechanism on microwave energy industrial applications and the high power microwave sources are discussed briefly. The current status of the research progress on microwave technology in industry has been reviewed, and the advances of microwave techniques and their potential industrial applications are presented.

Key words: microwave energy; microwave heating; thermal effects; industrial applications

微波是指频率在 300 MHz 至 300 GHz 之间的电磁波(自由空间波长在 1 mm 至 1 m 之间)。20 世纪 70 年代以来, 我国开展了微波应用技术的研究和磁控管等微波真空器件的研制。目前, 工业生产上逐渐采用了微波技术, 并取得了良好的经济效益。微波能应用作为一种新的辅助手段, 对各行业的技术改造和设备更新做出了贡献, 为企业发展提供了良好条件。

1 微波能应用的机理

微波能的主要工业应用领域是微波加热。微波加热的机理是基于微波与被加热物质分子之间的相互作用, 并被吸收转换成热量。

与红外加热、电炉加热、高频加热等加热方式相比, 微波加热具有一定的特殊性。微波加热可以深入被加热物质内部, 加热时热量直接来源于微波。单位体积内物质吸收微波的平均功率为:

$$\overline{P_d} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' |\mathbf{E}|^2 \quad (1)$$

式中: ε'' 为复介电常数的虚部; \mathbf{E} 为电场强度^[1]。

多数微波能的工业应用的机理可以用微波的热效应解释。然而有一些应用却很难用微波热效应进行机理解释。通常把微波与物体相互作用产生的不可归结于温度升高引起的效应, 称为微波非热效应。微波的非热效应是无法用温度变化来解释的特殊效应, 其机理还有待进一步验证和分析^[2]。

收稿日期: 2011-12-27; 修回日期: 2012-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC 60971051)

2 大功率微波源

ISM(Industrial Scientific Medical)频段主要是供工业、科学和医用的频段,包含频率 433 MHz,915 MHz,2 450 MHz,5 800 MHz,22 125 MHz 等,与通信使用的频段分开^[3]。目前国内用于工业加热的常用频率为 915 MHz 和 2 450 MHz。微波频率与功率的选择可根据被加热材料的形状、体积、材质、含水率的不同而定。

由于磁控管具有功率大、效率高、尺寸小、重量轻的特点,在工业应用中常选择磁控管作为微波源,而速调管、行波管、回旋管等主要用于科学研究。在大规模生产后,磁控管还具有了成本低的优势。工业上微波设备有连续波和脉冲两种形式,功率一般都在 kW 到 MW 量级。现有大功率微波源多采用单支高功率磁控管或者多支中小功率磁控管功率合成的方式。

3 微波能的产业应用

1) 微波技术在冶金行业中的应用

近年来,微波加热已经在矿石预处理、锻造、烧结、金属氧化物矿的碳热还原等方面获得了应用。微波加热应用于冶金过程中具有效率高、速度快、反应温度低等特点,是一种提高金属回收率、产品转化率、产品纯度的有效途径,符合我国节能减排的基本国策。实验室研究发现,利用 915 MHz 频率的微波辐射,在 800 °C~850 °C 的烧结温度下,使用苏打含量为 30% 烧结料水作为溶剂,恒温处理 20 min~30 min,黑钨精矿的钨浸出率能够达到 99%^[4]。秦文峰等人采用功率为 525 W 微波干燥物料质量为 15 g 的仲钨酸铵,用时 90 s,其脱水率达到 99.98%^[5]。在国内,昆明理工大学已经开展了大量关于微波冶金的应用研究,将该领域的理论研究和工艺开发提高到了一个新水平,并且已经向国内外转让先进技术 25 项,在微波技术的冶金行业应用中产生了深远影响^[6]。

2) 微波技术在污水处理上的应用

自 1992 年我国生产出了世界上第一台“实验用微波化学污水处理小型设备”,经过科学家长期的努力发展了微波污水处理技术和工艺。微波处理污水法是利用脉冲形式的微波与添加到污水中的处理药剂产生物理、化学、生物等效应,高效地降解污水中的有机物,催化有毒有害的化合物,杀灭细菌、原生物等,使排放达标^[7]。国伟林等用微波辐射-活性炭吸附法诱导催化降解甲基紫染料废水^[8]。实验结果表明,在微波辐射功率为 450 W,辐照 8 min 的条件下,100 mg/L 的甲基紫溶液脱色率可达 91.2%。污水微波处理法与传统方法相比,具有投资费用少,占地面积小,工艺流程较为简单,实施灵活及污水处理费用低等优点。

目前,微波污水处理已经在国内有机化工废水处理、工业锅炉回水处理、生活污水处理等方面得到了一定的推广使用,并且检测表明现有工艺能够满足全部理化指标达到(部分远低于)国家二类污染物最高允许排放标准的一级标准,效果显著^[9-10]。

3) 微波技术在有机合成中的应用

1986 年, Gedye 等人首次利用家用微波炉进行苯甲酸与醇的酯化反应,发现微波可大大加快有机合成反应速率,缩短反应时间。目前,利用微波技术促进有机反应的研究已成为该领域中的一个热点。对于其反应机理,学术界持两种不同观点:前者认为是由微波的热效应引起的,后者则认为微波加热还具有特殊效应,即“非热效应”。反应物介电常数的测量对微波化学的实验研究非常重要^[11-13]。由于微波具有选择性好、穿透力强、污染少的特点,能够使一些反应减少反应时间,提高转化率和收率。董迎等人用微波辐射法制备己二酸二乙酯,选取反应物醇、酸摩尔比为 2:0.5,采用 420 W 功率微波辐射物料 22 min,收率达到 80%,较传统方法节约了 1.5 h^[14]。采用传统方法热分解蒽与反丁烯二酸酯,在 138 °C 高温下加热 4 h,产率为 67%。而使用微波在 325 °C~361 °C 的温度范围内,辐射 10 min,所得到环加成产物的产率提高了 20%^[15]。现有对高分子合成的研究主要集中在应用于本体聚合、溶液聚合、乳液聚合、合成互穿聚合物网络及合成功能高分子这几方面。而大量文献和实验也充分表明了微波在有机合成中具有传统方法无可比拟的优势,随着绿色化学和组合化学的蓬勃发展,必将有广阔的应用前景^[16]。

4) 微波技术萃取中药有效成分

微波萃取的基本原理就是利用基体物质中不同组成成分吸收微波能力不同的特点,有选择地加热基体物质中部分区域或者萃取体系中的部分成分,使得被萃取物质从中分离并进入到萃取剂中,从而达到较高的产率^[17]。利用微波萃取中药有效成分的方法与传统的水煎法、索氏提取法及超声波强化提取等方法相比,具有穿透力强、选择性好、能耗低、污染小且提取率与提取质量高等优势。现有大量研究试验和文献[18-19]表明此项技术能广泛用于黄酮类、苷类、蒽醌类、生物碱、多糖、有机酸等成分的提取。该技术已有大量小试和部分中试成功的案

例,为其产业化打下了一定基础。

5) 微波技术在食品工业中的应用

微波具有升温速度快,加热时间短,辐射均匀的特点,在食品杀菌与干燥中已得到了较为广泛的使用,技术非常成熟。通家用微波炉使用的频率一般为 2 450 MHz,而食品工业所使用的微波加热设备的频率则有 915 MHz 和 2 450 MHz 两种,输出功率多为 kW 量级。大量研究与实践表明,微波技术能够较大幅度地减少食材在加工过程中营养成分的流失,同时可以使食品延长保存期。从常规的微波软化解冻、烹调干燥食物到利用微波进行消毒杀菌及酒类的陈化,微波与相关技术结合在食品加工上的应用已遍及粮油制品、调味品、禽肉制品、豆制品和奶制品、果蔬杀菌保鲜、水产品等方面,是企业节约成本、提高产品质量的有效途径^[20-21]。

6) 微波技术在石油化工业中的应用

微波在石油开采、输送、冶炼中的应用将有巨大的开发前景,在原油的开采方面可以利用微波开采稠油及高凝原油,由于这些油粘度大,粘附于砂岩中难以用常规的水驱方法进行开采,而采用其他方法耗资大,效率低。微波作用于稠油后会起微波化学变化和微波的热效应,它不仅改变了岩石的润湿性,改善了波及系,提高了油藏的采收率,而且在开采的过程中,由于微波作用的热效应和非热效应,将高分子化合物转变成低分子的有机化合物,通过提高油的质量,降低粘度以达到提高采收率的效果。微波在油气田的开发还有其他方面的应用如:微波破乳、微波脱硫、脱蜡、微波解堵以及微波防止天然气中水化物的形成等等。马宝岐等^[22]的微波脱蜡实验结果表明将微波功率从 255 W 增加到 850 W,聚结石蜡(含水 25%,含砂 1%)的脱蜡时间由原先的 10 min 减少了 4/5。在石化煤炭工业中,利用微波激发甲烷气相裂解,微波石油蒸馏以及煤炭的等离子气化等。不过,这些具体应用都还处于探索阶段,未经过生产实践的验证,还需要不断地试验才能进一步推广。

7) 微波技术在烟草行业中的应用

微波在烟草行业的应用主要是烟丝干燥及烟梗处理。微波连续冻干烟丝技术是指将烟丝通过浸泡处理后,冷冻至共晶点温度以下,在真空环境中,使用微波升华去掉烟丝中的多余水分,最后在恒定温度与湿度下将烟丝处理至工艺所需要水分的整个过程^[23]。而潮湿的烟梗采用传统的烘干方法只能烘干表面,梗内部却仍然潮湿,改用微波就能达到很好的效果。四川宏普微波科技有限公司已自主研发出了最大输出功率 40 kW,功率 0~40 kW 无极可调,工作频率为 2 450 MHz 的设备^[24]。与传统的冻干技术相比,微波干燥技术不仅能使烟丝的填充力增加,而且缩短了生产周期,加快了干燥速度,简化了生产工艺,减少了生产线占地规模,并已经达到中试水平,具有在烟草行业推广的应用价值^[25]。

4 微波技术的发展

1) 大功率微波磁控管

在实际生产过程中,采用大功率微波源才能满足工业生产规模的需求。磁控管是一种高效低成本的大功率微波真空器件,适用于微波能工业应用,能够有效地降低成本,提高生产效率。现有 2 450 MHz 磁控管单管功率容量已经能够达到 30 kW,915 MHz 磁控管的单管功率已能达到 100 kW。目前,磁控管仍然是现有微波电子管中效率很高的微波器件,并且向小型化、高效率、大功率、低成本的方向发展。

2) 微波功率合成技术

随着功率容量的增加,单个磁控管的生产成本显著增加,相对较为昂贵。同时因为其物理机制和工艺结构的限制,磁控管的单管输出功率不能无限制增加。采用多磁控管功率合成技术,来实现高功率微波源是一种经济有效的方法。通过微波功率注入可以实现对磁控管的频率锁定,基于阳极电压或者直流磁场调节形成类锁相环,控制输出相位的稳定。因此,基于磁控管的注入锁频技术,使用多磁控管进行功率合成是今后研究的方向。

3) 微波腔体设计

微波在工业应用中通常需要将原材料置于封闭的腔体内进行微波辐射。由于工业生产规模的需求,腔体尺寸远远大于微波波长。在腔体内,原材料的特性会随着微波加热温度发生变化,可能出现热失控或者局部热点,影响微波工业应用的安全性。随着工业化的推进,电大尺寸复杂微波腔体的设计会逐渐成为研究的方向。

5 总结和展望

现有的研究及实践表明:微波技术在工业应用中有其独特的优势和令人鼓舞的前景。微波能在工业应用上的一些机理还不够清楚。如何能更好地推广微波能应用,将高新技术转化为生产力,需要进一步深入科学研究和实

践验证。

节能减排是我国的基本国策,是我国经济结构调整和经济增长模式改变的必由之路。微波能的工业应用必将推进我国产业结构优化升级,在提高生产能力的同时降低能耗,促进经济的可持续发展^[26]。随着大功率微波源技术的不断发展,微波能将会在更多的工业领域得到更广泛的应用,为我国的国民经济发展和社会进步做出贡献。

参考文献:

- [1] 夏祖学,刘长军,闫丽萍,等. 微波化学的应用研究进展[J]. 化学研究与应用, 2004,16(4):441-444. (XIA Zuxue,LIU Changjun,YAN Liping,et al. Progress in microwave chemistry research and applications[J]. Chemical Research and Application, 2004,16(4):441-444.)
- [2] 张兆镛,钟若青. 微波加热技术基础[M]. 北京:电子工业出版社, 1995:49-81. (ZHANG Zhaotang,ZHONG Ruoqing. Microwave heating technology[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 1995:49-81.)
- [3] 金钦汉,戴叔珊,黄卡玛. 微波化学[M]. 北京:科学出版社, 1999:1-3. (JIN Qinhan,DAI Shushan,HUANG Kama. Microwave Chemistry[M]. Beijing:Science Press, 1999:1-3.)
- [4] 赵秦生. 微波在黑钨精矿的苏打烧结中的利用[J]. 稀有金属与硬质合金, 2003,31(1):51-52. (ZHAO Qinsheng. Application of microwave in sintering wolframite soda mixture[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2003,31(1): 51-52.)
- [5] 张文朴. 微波加热技术在冶金工业中的应用研发进展[J]. 中国铝业, 2007,31(6):20-23. (ZHANG Wenpu. Research progress on application of microwave heating technology in metallurgical industry[J]. China Molybdenum Industry, 2007, 31(6):20-23.)
- [6] 昆明大学非常规冶金教育部重点实验室. 微波冶金领域中当之无愧的引领者[J]. 云南科技管理, 2011,24(1):92. (Key Laboratory of unconventional metallurgy. The fully deserve leader of microwave metallurgy area[J]. Yunnan Keji Guanli, 2011,24(1):92)
- [7] 虞睿,颜幼平,杨刚毅,等. 微波法处理生活污水可行性试验研究[J]. 水处理技术, 2008,34(4):19-22. (YU Rui,YAN Youping,YANG Gangyi,et al. Laboratory study on sanitary sewage treatment by microwave method[J]. Technology of Water Treatment, 2008,34(4):19-22.)
- [8] 国伟林,高丽,姬广磊,等. 甲基紫染料废水的微波诱导催化降解[J]. 济南大学学报:自然科学版, 2006,20(3):213-215. (GUO Weilin,GAO Li,JI Guanglei,et al. Degradation of methyl violet dye wastewater by microwave energy[J]. Journal of Jinan University(Science and Technology), 2006,20(3):213-215.)
- [9] 王剑虹,严莲荷,周申范,等. 微波技术在环境保护领域中的应用[J]. 工业水处理, 2003,23(4):18-22. (WANG Jianhong, YAN Lianhe,ZHOU Shenfan,et al. Application of the microwave technology to the environmental protection[J]. Industrial Water Treatment, 2003,23(4):18-22.)
- [10] 徐文倩,郑广宏,黄钟霆. 微波技术在水污染治理中的应用[J]. 江苏环境科技, 2006,19(1):26-30. (XU Wenqian, ZHENG Guanghong,HUANG Zhongting. The application of microwave technique in dealing with water pollution[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2006,19(1):26-30.)
- [11] 曾晓勇,杨阳,黄卡玛. 一种用于微波化学实验的新型 TEM Cell[J]. 信息与电子工程, 2007,5(1):44-47. (ZENG Xiaoyong,YANG Yang,HUANG Kama. A novel TEM cell used in the experiments of microwave chemistry[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(1):44-47.)
- [12] 方峪枫,胡荣骅,杨晓庆,等. 电解质溶液复介电常数测量中气泡影响的分析[J]. 信息与电子工程, 2007,5(1):52-56. (FANG Yufeng,HU Ronghua,YANG Xiaoqing,et al. Influence of air bubbles on the measurement of complex permittivity of electrolyte solution[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(1):52-56.)
- [13] 王志辉,方峪枫,杨晓庆,等. 电解质溶液复介电常数测量中金属杂质的影响[J]. 信息与电子工程, 2007,5(3):220-224. (WANG Zhihui,FANG Yufeng,YANG Xiaoqing,et al. Influence of metal impurities on the measurement of complex permittivity of electrolyte solution[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(3):220-224.)
- [14] 董迎,范嘉,李文鹏,等. 己二酸二乙酯合成中的微波催化行为研究[J]. 天津理工学院学报, 2003,19(2):106-108. (DONG Ying,FAN Jia,LI Wenpeng,et al. Study of behavior of microwave catalysis in preparation of diethyl adipate[J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2003,19(2):106-108.)
- [15] Giguere R J,Bray T L,Duncan S M,et al. Application of Commercial Microwave ovens to Organic Synthesis[J]. Tetrahedron Letters, 1986,27(41):4945-4948.
- [16] 莫莉萍,周璇,李拥军,等. 微波技术在现代有机合成中的应用进展[J]. 广东化工, 2004,31(4):44-48. (MO Liping, ZHOU Xuan,LI Yongjun,et al. Recent Development of Microwave in Modern Organic Synthesis[J]. Guangdong Chemical

- Industry, 2004,31(4):44-48.)
- [17] 苏佳华. 微波萃取技术在中药有效成分提取中的应用[J]. 海峡药学, 2008,20(7):123-125. (SU Jiahua. Application of the technology of microwave extraction in extracting effective ingredients of Chinese medicine[J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2008,20(7):123-125.)
- [18] 梅成. 微波萃取技术的应用[J]. 中成药, 2002,24(2):134-135. (MEI Cheng. Application of micro-wave extract technology[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2002,24(2):134-135.)
- [19] 郭振库,金钦汉,范国强. 微波帮助提取中药金银花中有效成分的研究[J]. 中国中药杂志, 2002,27(3):189-192.
- [20] 郭月红,李洪军. 微波杀菌技术在食品工业中的应用[J]. 保鲜与加工, 2006,6(1):44-45. (GUO Yuehong,LI hongjun Application of microwave sterilization in food industry[J]. Storage & Process, 2006,6(1):44-45.)
- [21] 刘钟栋,陈肇敏,欧军辉,等. 微波紫外线协同生物学作用及紫外线微波炉杀菌研究[J]. 食品科技, 2007(12):140-141. (LIU Zhongdong,CHEN Zhaotan,OU Junhui,et al. Synergistic biological effect of microwave and ultraviolet in sterilization[J]. Food Science and Technology, 2007(12):140-141.)
- [22] 马宝岐,倪炳华. 微波在油气田开发中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1997,27(3):57-60. (MA Baoqi,NI Binghua. Application of microwave to the exploitation of oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997,27(3):57-60.)
- [23] 梁贵安,彭金辉,苏四清,等. 84 kW 微波烟梗膨胀生产试验装置控制系统研究[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版, 2011,36:110-113. (LIANG Guian,PENG Jinhui,SU Siqing,et al. Research on the 84 kW microwave assisted expansion of tobacco stems and industrial tests[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology:Natural Science Edition, 2011,36:110-113.)
- [24] 刘广洲,周昆,刘毅,等. 微波连续冻干烟丝研究[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版, 2011(36):258-261. (LIU Guangzhou,ZHOU Kun,LIU Yi,et al. Study on microwave freeze-drying cut tobaccos[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology:Natural Science Edition, 2011(36):258-261.)
- [25] 杨涛,李敏,李姗姗,等. 微波膨胀过程中烟梗及由其制备的颗粒的物理化学变化[J]. 烟草科技, 2008(2):33-38. (YANG Tao,LI Min,LI Shanshan,et al. Physical and Chemical Changes of Tobacco Stem and Stem Granules During Microwave Expansion[J]. Tobacco Science & Technology, 2008(2):33-38.)
- [26] 季天仁. 从微波能应用技术的发展探索其产业化前景[J]. 工业加热, 2004, 33(5):1-4. (JI Tianren, The Development and Prospects of Microwave Power Industrial Application[J]. Industrial Heating, 2004,33(5):1-4.)

作者简介:



刘长军(1973-),男,河北省邢台市人,博士,教授,主要研究方向为电磁场与微波技术.email:cjliu@scu.edu.cn.

吴昕(1989-),女,浙江省舟山市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术.